第2章

カメラの手ぶれ補正に角速度センサがどのように使われているか

代表的な応用事例を通して理解するセンサのしくみや使い方

山崎健一

角速度センサの代表的な応用例の一つに，ビデオ・カメラやディジタル・スチル・カメラにおける手ぶれ補正が挙げられる．ここでは，手ぶれ補正のしくみを詳しく解説し，そこで利用される角速度センサの使い方を理解する．（編集部）

最近のディジタル・スチル・カメラやディジタル・ビデオ・カメラは，手ぶれ補正機能を持った機種が多くなってきています．手ぶれ補正は，もともとはアナログ・ビデオ・カメラに使用されていた技術ですが，非常に便利な機能なので最近ではカメラ付き携帯電話にも装着されてきました．ここでは角速度センサの応用例としてディジタル・スチル・カメラなどで使用されている手ぶれ補正について紹介します．

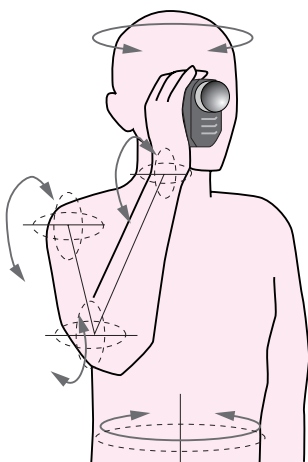



図1　手ぶれの原因
手が動く，肩が動く，ひじが動く，体が動く，頭が動くなど多数ある．

1．補正方法には電子式と光学式がある

手ぶれ補正の方式には大きく分けて電子式（ディジタル方式）と光学式（アナログ方式）があります．手ぶれはカメラのシャッタが開いている間（イメージ・センサに露光している間）に手が動いてしまうことで発生します．特に筆者のような初心者に多いのは，シャッタを押すときにカメラを動かしてしまうことです．この場合には見事な手ぶれ写真になってしまいます．

● 手ぶれが発生する原因

シャッタ速度が遅くなればなるほど，また望遠レンズを使用すると，手ぶれの影響は大きくなります（プロでも起きる）．三脚を使うことが一番効果的ですが，被写体によっては三脚が使用できない場合もあります．また，重くて邪魔と感じる人が多いのではないでしょうか．大事なシャッタ・チャンスを逃さないためにも，手ぶれ補正機能は筆者のような超アマチュア写真家にとっては夢のような機能です．

図1に手ぶれの原因を示します．初心者の場合は，

- 手が動く　● 肩が動く　● ひじが動く
- 体が動く　● 頭が動く

など，手ぶれが起きる要因が多数あります．

図2はカメラ側から見た手ぶれの方向を示しています．手ぶれによってカメラには，

- X，Y，Z軸方向の平行移動

KeyWord　ヨーイング，ピッチング，ローリング，電子式，光学式，レンズ・ユニット・シフト型，イメージ・センサ・シフト型，レンズ・シフト型，

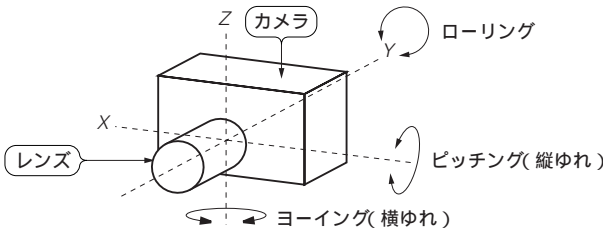



図2　カメラ側から見た手ぶれの方向
回転成分であるヨーイングとピッチングが撮影画像に与える影響が非常に大きい．

● 回転成分のヨーイング，ピッチング，ローリング

の計6種類のカメラ・シフト（移動）が発生してしまいます．これらのうち回転成分であるヨーイングとピッチングが撮影画像に与える影響が非常に大きいので，通常の手ぶれ補正機能にはこの二つの回転運動を打ち消すような動作が要求されます．

手ぶれ検出には通常は角速度センサが使われますが，前述したようにヨーイング用とピッチング用の2個の角速度センサが必要になります．以前は角速度センサが高価であったことと，信号処理回路が複雑になってしまうことから，1個の角速度センサで済ましてしまうこともありました．しかし，最近ではセンサの価格も下がり，また回路も最適化されてきたので，最低でも2個使用するケースがほとんどでしょう．

● 電子式手ぶれ補正方式について

電子式手ぶれ補正方式は，ソフトウェアで手ぶれ補正を行う方法です．従って，特別なハードウェアが不要なため小型化が容易です．最近ではカメラ付き携帯電話などで採用されています．

図3に電子式手ぶれ補正の動作例を示します．この方式ではイメージ・センサで決まる撮影可能画素領域を一定のサイズに狭くして，それを有効画素領域とします（その他は余裕分）．

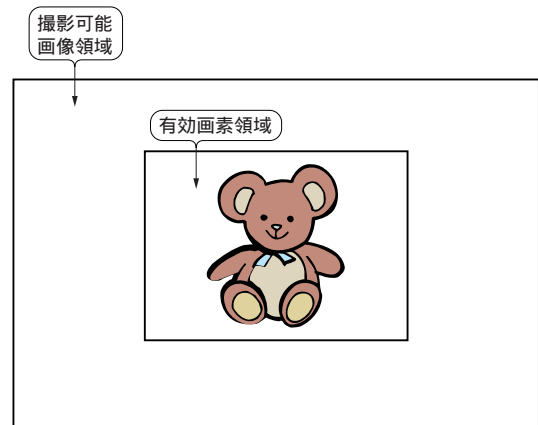
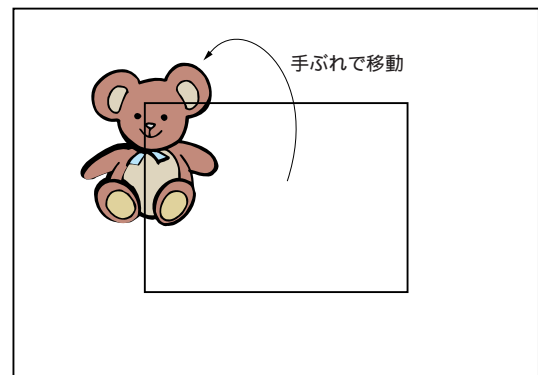
①イメージ・センサが撮影した画像を一時的にバッファ・メモリに格納する［図3(a)］．

②続いて，次の画像を撮影する．この2番目の画像もバッファ・メモリに格納する．このとき，被写体が手ぶれにより1番目の画像からずれてしまったと仮定する［図3(b)］．

③ディジタル・スチル・カメラは1番目と2番目の画像を比較して，被写体が同じように画面の中に収まるように，2番目の画像で使用するデータ領域をずらした場所を，新しい有効画素領域にする［図3(c)］．

④その結果，手ぶれのない画像が得られるので，これをメイン・メモリに保存する．

この方式では，

● 撮影可能な領域としてイメージ・センサの一部しか使用しないため，イメージ・センサの能力を100％発揮できない（一般的なカメラの有効画素数はイメージ・センサ

(a) 1枚目の撮影画像

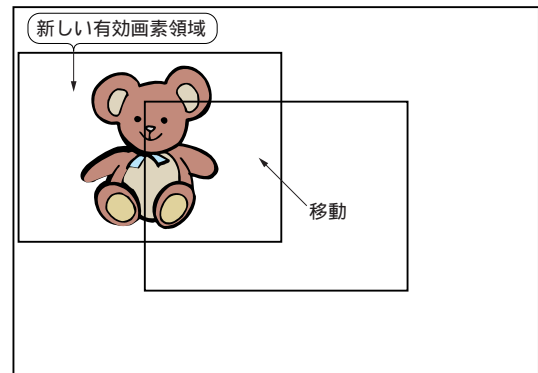
(b) 2枚目の撮影画像

(c) 手ぶれ補正後の画像

図3　電子式手ぶれ補正の動作例
イメージ・センサで決まる撮影可能画素領域を一定のサイズに狭くして，それを有効画素領域としている．

2

の有効画素数の90％程度だが，電子式手ぶれ補正の場合には50～60％程度になってしまう）

という欠点のほか，

- 動画には比較的効果があるが静止時には効果が薄い
- 画像の劣化が大きい

などの欠点があります．しかし，

- 特別なハードウェアが不要（ただし演算時間短縮のために演算用プロセッサを追加する場合がある）

という大きな特徴があるので，前述のようにカメラ付き携帯電話などで使われています．なお，静止時の効果についてはアルゴリズムなどの工夫によって改善が可能です．例えば，

- 1回の撮影で複数枚（例えば4枚）の写真を一定間隔で撮影して，一つ一つの画像から特徴的な点を見つけ出して，そこを基準に重ね合わせる
- 手ぶれは一般的に「揺れの周波数が低い場合は揺れが大きい」という特徴があるので，手ぶれ周波数と手ぶれ振幅の相関関係を作り出し，1枚の画像中の色や明度などから移動情報を演算することで画像の修正を行う

などの方法があります．

このほか，電子式手ぶれ補正方式には撮影対象が動いたために発生する「被写体ぶれ」も補正できる場合があります．

● 光学式手ぶれ補正方式について

光学式手ぶれ補正方式は，専用のハードウェアを用意して，本格的に手ぶれ補正を行う方式です．ハードウェアの方式によって，レンズ・シフト型とイメージ・センサ・シフト型があります．通常，光学式手ぶれ補正といった場合には，前者のレンズ・シフト型を指します．

これらの方式では初めに説明したように，手ぶれ検出用に角速度センサが必要です．

▶ レンズ・シフト（移動）型

図4にレンズ・シフト型手ぶれ補正方式の動作を示します．

①手ぶれがない場合は図4(a)のように，像はイメージ・センサのA点の位置にできます．

②手ぶれが発生すると図4(b)のように，像がイメージ・センサのA点からA'点に移動してしまいます．このままだと光軸がずれたことになります．

③そこで手ぶれを打ち消す方向に補正用レンズを動かして，この光軸のずれを補正します．

この光の動きを変えるためには光の屈折を利用するのが一番簡単です．一般にカメラのレンズは複数枚のレンズで構成されているので，このレンズ群の中の一部のレンズを手ぶれ補正用レンズに置き換えます．

実際には手ぶれによってどのくらいカメラが動いたかという情報が必要ですので，これには角速度センサが使われます．角速度センサがカメラの手ぶれ量を検出すると，光が届く位置のずれを補正する方向に手ぶれ補正用レンズを動かします．この補正によってカメラが動いても，シャッタが開いて最初にイメージ・センサに届いた光の位置A点と，シャッタが閉じる寸前にイメージ・センサに届いた光の位置A'点を，図4(c)のように同じ位置に補正することが可能になります．

この方式には，

- レンズごとに最適設計ができるため手ぶれ補正効果が大きい
- レンズ内部で手ぶれ補正ができるのでフィルム式カメラにも応用できる
- ファインダ内の像にも効果がある

という長所のほかに，

- 専用レンズになってしまうため，レンズが大きく（重く），価格が割高になってしまう

(a) 正常な状態

(b) 手ぶれの状態

(c) 手ぶれ補正後

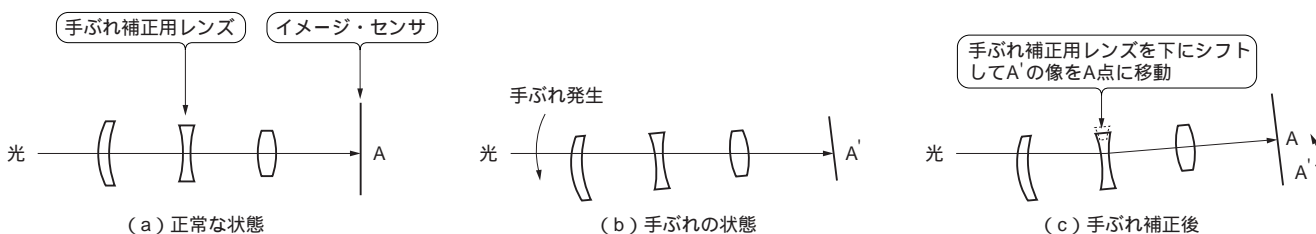



図4 レンズ・シフト型手ぶれ補正方式の動作
手ぶれを打ち消す方向に補正用レンズを動かす

- 画質が若干劣化してしまう（色収差など）
- レンズ群の設計が難しい

という欠点もあります．

この方式には，IS（image stabilizer）方式（キヤノン），VR（Vibration Reduction）方式（ニコン），Super Steady Shot 方式（ソニー），Mega Ois 方式（松下電器産業）などがあります．

図5にVR方式のカメラ構成を示します．

▶ イメージ・センサ・シフト（移動）型

この方式では，移動するのはレンズではなく，イメージ・センサのほうを移動させて補正します．図6にイメージ・センサ・シフト型手ぶれ補正方式の動作を示します．

実際の補正動作はレンズ・シフト型に似ています．角速度センサがカメラの移動を検出すると，光が届く位置の分だけイメージ・センサを動かしてしまうというものです．つまり，本来，光が届く位置にイメージ・センサを移動させてしまおうというアイデアです．従って，角速度センサはカメラ内部に設けることになるため，ボディ内蔵型手ぶれ補正方式とも呼ばれます．この方式には，

- カメラ本体に補正機構が組み込まれているため，一眼レフ・カメラ（レンズ交換式カメラ）では既存のレンズをそのまま使用できる
- 基本的に画像劣化がない
- 手ぶれ補正レンズがないので小型になる
- イメージ・センサを微振動させることで，アンチダスト（ごみ取り）機能を持たせることが可能

などといった特徴があります．欠点としては，

- 望遠レンズでの効果が低い
- ファインダ内の像には効果がない
- イメージ・センサが大きくなったときは移動可能領域を大きくする必要があり，設計が難しくなる

などがあります．この方式にはセンサ・スイング方式（コニカミノルタ）やSR（Shake Reducton）方式（ペンタックス）などがあります．図7にイメージ・センサ・シフト型手ぶれ補正の概要を示します．

▶ レンズ・ユニット・シフト（移動）型

この方式は前述の手ぶれ補正方式とは全く異なった方式です．角速度センサで手ぶれを検出する点は同じですが，イメージ・センサを含むレンズ・ユニットごと手ぶれに応じて微小回転させることで光軸を一定に保つというアイデ

図5　VR機能付きレンズの構成

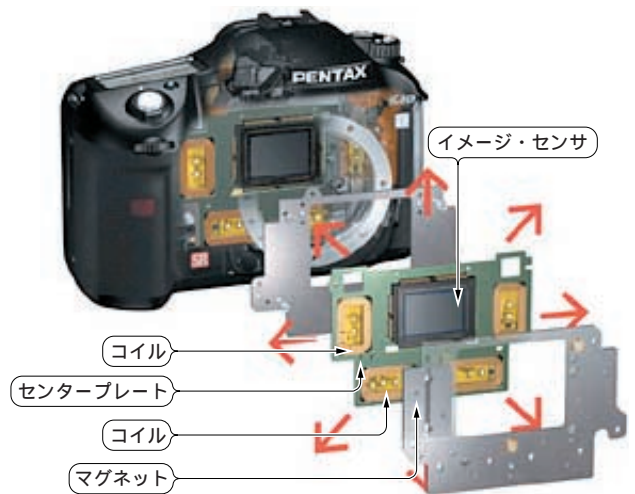
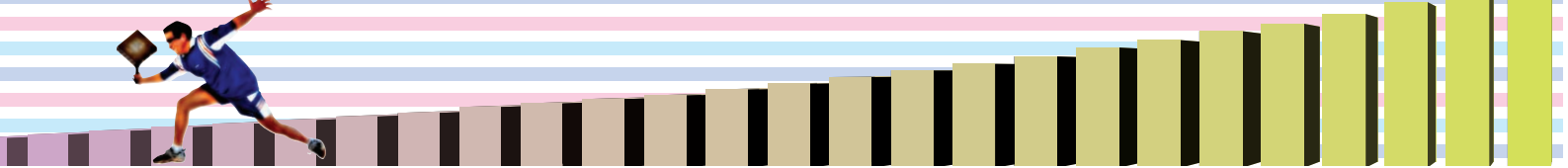



図7[10]　イメージ・センサ・シフト型手ぶれ補正の概要
ペンタックスのWebページから引用．

図6　イメージ・センサ・シフト型手ぶれ補正方式の動作
実際の補正動作はレンズ・シフト型に似ている．角速度センサがカメラの移動を検出すると，光が届く位置の分だけイメージ・センサを動かす．

アです．Anti-Shake機能（コニカミノルタ）とも呼ばれます．

ほかの手ぶれ補正方式がイメージ・センサと被写体像の位置関係を補正する方法なのに対して，この方式ではカメラに与えられる手ぶれ振動をレンズ・ユニットまで伝えないようにする，言い換えると免震構造のアイデアになっています．そのため，イメージ・センサと一体化したレンズ・ユニット全体をカメラ内部で手ぶれとは反対方向に微小回転させるので，システムの光学系全体の位置関係を崩すことなく手ぶれ補正が実現できます．

原理的には最も単純で，ほかの方式のように特殊な光学系設計や画像処理技術などを必要としません．そのため，手ぶれ補正に伴うノイズ強調や画素数のロス，光学収差などといった設計時の諸問題とも無縁になります．

筆者は非常にユニークなアイデアだと思っていますが，レンズ・ユニットが大きい場合は機構の大型化や消費電力増大などの問題が生じてしまうという欠点もあります．そのため，今のところコンパクト・タイプのディジタル・スチル・カメラ用にとどまっています．

2．角速度センサの使い方

● 手ぶれ補正に角速度センサを使う理由

角速度センサは角速度（1s間に何度動いたか）を検出するセンサです．図8に自動車における例を示します．図8の車は旋回運動をしていますが，この車が1s間に30°回転すると，この車の回転角速度は30°/sになります．旋回半径Rが小さい場合はゆっくりと回ることになりますが，Rが長いと逆に速く回ることになります．従って，車の実際の速度および加速度は，Rが大きくなるほど大きくなりますが，（回転）角速度という点から見ると両者とも同じ30°/sです．

一般的には加速度センサのほうがポピュラですので，手ぶれ補正には加速度センサが使用されると考えがちですが，図2で説明したように手ぶれ補正に関係があるのは角速度のほうです．

表1　角速度センサの一例

型　名	感　度 [mV/°/s]	感度偏差 [%]	感度ドリフト [%]	検出範囲 [°/s]	ノンリニアリティ [%]	ゼロ点 [V]	ゼロ点ドリフト [mV]	応答性 [Hz]	残留ノイズ [mV]
XV-3500CB	0.67	±5(max)	±5(max)	±100	±5(max)	1.35	—	200	$20_{p\text{-}p}$
ENR-03R/D	0.67	—	—	±300	±5	1.35	—	50	—
CG-L53B0/B1	0.66	±20	−15～+5	±90	—	—	−5～+75	100	—
CGU-350	0.67	±20	—	—	—	—	—	30	—
IDG-300	2.0	±5(max)	±10	±500	±1	1.5	±300	140	0.014 [°/s/$\sqrt{Hz}$]

（a）手ぶれ補正用

型　名	感　度 [mV/°/s]	感度偏差 [%]	感度ドリフト [%]	検出範囲 [°/s]	ノンリニアリティ [%]	ゼロ点 [V]	ゼロ点ドリフト [mV]	応答性 [Hz]	残留ノイズ [mV]
EWTS86K	25	±10	—	±60	—	2.5	±400	7(−4～0dB)	$10_{p\text{-}p(max)}$
SIBGシリーズ	25	±10	—	±60	0.5(max)	2.5	±400	10(−7～−2dB)	$4.5_{RMS(max)}$
CGAシリーズ	25	±10	—	±60	—		±50	7(−4dB)	$5_{p\text{-}p(max)}$
MGQ1-01B	0.66	±20	±20	±300	—	1.34	—	20	—
CRS03シリーズ	20	±1	±5(max)	±100	±3(max)	$0.5V_{DD}$	±60	10(−3dB)	1_{RMS}(3～10Hz)
CRS07-11	3.49	±5(max)	±5(max)	±573	—	$0.5V_{DD}$	±100	55(−3dB)	1_{RMS}(3～30Hz)
ADXRS401	15.0	—	±15(max)	±75	0.1	2.5	—	40(−3dB)	3_{RMS}(BW＝10Hz)
ADIS16080	10.24 [LSB/°/s]	—	±5	±80	0.15	2048 [LSB]	±85 [LSB]	40(−3dB)	43 [LSB_{RMS}]

（b）一般用（主にカー・ナビゲーション・システム用）

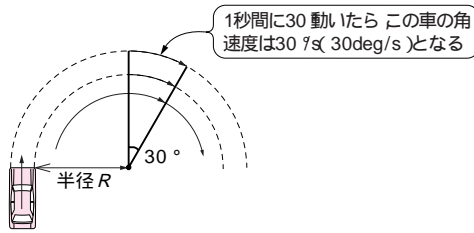



図8　自動車の回転運動と角速度センサの検出角度の関係
旋回半径 R が小さい場合はゆっくりと回ることになるが，R が長いと逆に速く回ることになる．

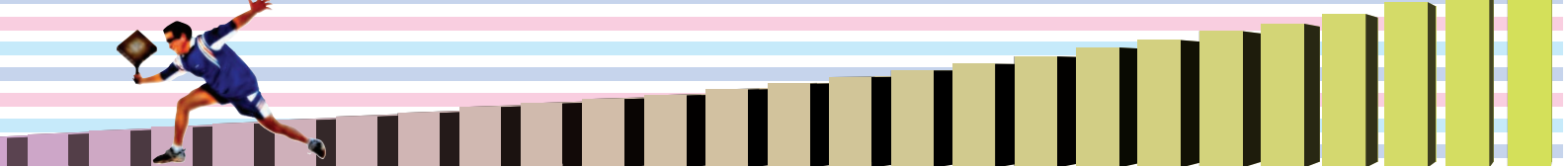
図9[4]　角速度センサからアナログ出力を取り出して増幅する回路
ハイパス・フィルタとローパス・フィルタを含む．

● 角速度センサの仕様

角速度センサの仕様を**表1**に示しました．

● 使用上の注意点

▶ 直流成分カット用にハイパス・フィルタが必要

手ぶれ補正用角速度センサは，ディジタル・スチル・カメラや携帯電話のような民生機器に使用されるため，比較的安く入手できる反面，性能の点で自動車用のものに比べると見劣りします．特にゼロ点ドリフトは結構大きいため，場合によっては**図9**のように直流カット用ハイパス・フィルタが必要になります．ハイパス・フィルタのカットオフ周波数f_{cH}[Hz]は，

$$f_{cH} = 1/2\pi C_1 R_1$$
$$= 1/2\pi \times 4.7 \times 10^{-6} \times 100 \times 10^3 \quad 0.34$$

になります．

ビデオ・カメラのような動画を扱う機種では，意図的に撮影方向を変える場合があります．例えばパンニング(水平方向のゆっくりした移動)やチルトアップ/ダウン(垂直方向のゆっくりした移動)などです．これと手ぶれを区別

	他軸感度[%]	動作電圧/電流[V/mA]	動作温度範囲[℃]	外形寸法[mm]	メーカ	備考
	±5(max)	3±0.3/1.7	−20〜+80	5×3.2×1.3	エプソントヨコム	ドライブ周波数は46.5kHz/50.3kHz　スリープ・モードあり
	—	2.7〜5.25	−5〜+75	8×4×2	村田製作所	2軸で使用するときはENR-03RとENR-03Dをペアで使用(干渉を避けるため)
	—	3.0/	—	10×6×2.5	NECトーキン	—
	—	3±0.3/8(max)	—	7×7×1.3	ソニー	2軸タイプ，アンプ内蔵(100倍)
	±2	3〜3.3/9.5(max)	0〜70	6×6×1.4	米国InvenSense社	2軸タイプ，ドライブ周波数は12kHz/15kHz，検出範囲が±30 °/sのIDG-1000もある

	他軸感度[%]	動作電圧/電流[V/mA]	動作温度範囲[℃]	外形寸法[mm]	メーカ	備考
	—	5±0.25/	−40〜+85	11.2×7.6×10	パナソニックエレクトロニックデバイス	カーナビ用，傾斜角付き(傾斜のないEWTS86Nもある)
	—	5±0.25/6(max)	−40〜+85	12.5×8.4×12.4	富士通メディアデバイス	カーナビ用
	—	—	−40〜+85	13×8×12.5	シチズン時計	カーナビ用
	—	2.9~15/3(max)	−5〜+75	22.9×18×2.3	マイクロストーン	—
	±5(max)	5±0.25/50(max)	−40〜+85	29×29×18.2	シリコンセンシングシステムズジャパン	—
	—	5±0.25/50(max)	−20〜+60	22×21×12.6	シリコンセンシングシステムズジャパン	—
	—	5±0.25/6	−55〜+125	7×7×3.65	米国Analog Devices社	REF，アンプ，温度センサ内蔵，セルフ・テスト・モード付き，ドライブ周波数：14kHz，ADXRS150/300も用意
	2.05[LSB/g]	5±0.25/7	−40〜+85	8.2×8.2×5.2	米国Analog Devices社	12ビットA-Dコンバータ，REF，温度センサ内蔵，SPI出力，ADIS16100〜350も用意

する場合にもハイパス・フィルタは必要です．

区別化するf_{cH}は各メーカのアルゴリズムによるところが大きいので，**図9**の定数はあくまで参考例です．なお，センサ出力にはセンサ自身のドライブ周波数によるノイズ（ENR-03の場合は30kHz～35kHz）が重畳しているので，ノイズ除去のために1kHz程度のローパス・フィルタを入れておきます．

▶ 二つのセンサを使うときはセンサのドライブ周波数が違うものを使用する

前述したように，手ぶれ補正ではヨーイング用とピッチング用の二つの角速度センサが必要です．従って，1軸タイプの角速度センサを使用するときは，当然ながら2個必要になります．

このとき，センサのドライブ周波数が同じものを使ってしまうと，互いが干渉してしまう危険性があります．そのため，メーカではドライブ周波数が異なる2種類のセンサを用意しています．カタログに載っていない場合はメーカに確認してみてください．例えばENR-03（村田製作所）の場合は，ENR-03RとENR-03Dがあるので，この二つをペアで使用することをメーカは推奨しています．

最近では1パッケージながら2方向の角速度が検出できる2軸タイプの角速度センサも登場してきました．もちろん，IC内部では互いのセンサの干渉を避けるために，ドライブ周波数が異なるように設計されています．2軸タイプの角速度センサは，小型化の点では有利なので，今後の商品化に期待したいところです．

図10に角速度センサの内部回路を示します．センサ信号は交流なので，同期検波回路を使って信号の極性判別を行っています．同期検波というのは，角速度信号①とf_{REF}（基準電圧）を乗算することをいいます．乗算後ローパス・フィルタで交流成分を取り除くと，そこには角速度に比例した直流成分が得られます．同期検波では交流信号の極性判別が可能ですから，プラス/マイナスの極性がある交流信号の検出によく利用されます．

▶ 検出範囲は±30 °/s以上，A-Dコンバータには10ビット以上が必要

手ぶれ補正のアルゴリズムによっても違いますが，通常，角速度センサに要求される角速度の検出範囲は±30 °/s以上必要といわれています．**表1**に示したように，ほとんどのセンサの検出範囲はそれをカバーできています．

センサの感度は**表1**から分かるように，センサ単体では約0.67mV/ °/sです．極端に感度が高いものはアンプを内蔵しています．形状が大きいセンサほど感度の点で有利なのですが，携帯電話などに内蔵することを考えると，センサ形状は小さいことが重要になります．今後しばらくは感度と形状のバランスを考慮して，センサを選択することが重要になるかと思いますが，価格が最優先されてしまうケースがほとんどでしょう．

図11に手ぶれ補正回路の構成例を示します．A-Dコンバータの分解能は10ビット以上あることが望ましいです．A-Dコンバータ内蔵型1チップ・マイコンでも分解能が10ビットある品種が多数あります．

図10　角速度センサの内部回路
同期検波回路を使って信号の極性判別を行っている．

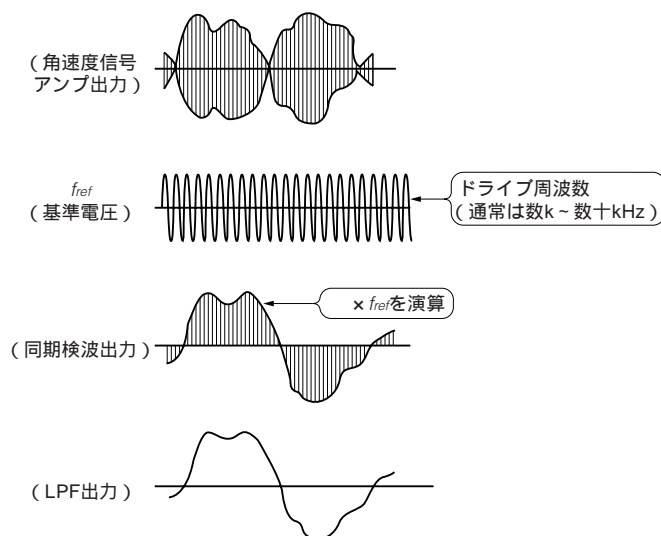
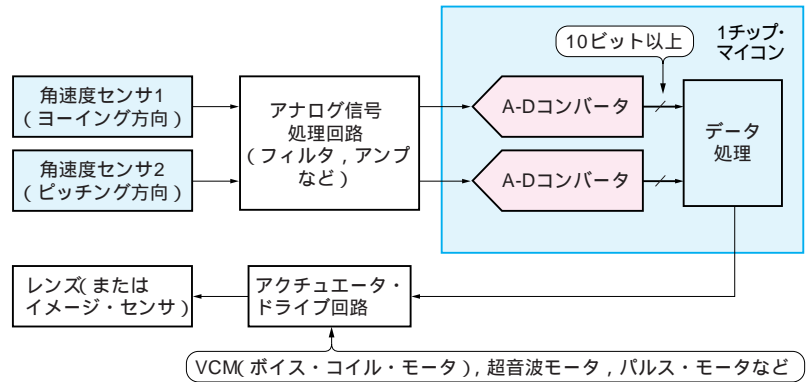



図11
手ぶれ補正回路の構成例

手ぶれ補正用レンズやイメージ・センサをシフト(移動)するためにボイス・コイル・モータや超音波モータなどが使われます.

図11では載せていませんが(アルゴリズムでも違いますが)，手ぶれ補正処理は通常，サーボ回路の構成になるため，レンズやイメージ・センサの位置情報をフィードバックする必要があるので，PSD(position sensitive detector)やホール・センサによる位置センサが追加されます.

ステッピング・モータを使うなどして，サーボ回路ではなく，オープン・ループ構成で済ませる場合もあります．回路が簡単になるという特徴があります.

図11のアナログ信号処理回路の中のハイパス・フィルタやアンプを1チップ・マイコンに内蔵させてしまうと，本当にすべての処理が1チップでできてしまいます．なお，アクチュエータの位置情報を角速度から演算するためには，角速度を積分する必要があります(°/sの積分は角度になる)が，この積分器にはディジタル・フィルタが使われます.

参考・引用*文献

(1) 新谷 大ほか；レンズユニットスイング方式手ぶれ補正ユニットの開発，Konica Minolta Technology，Vol.3，2006年，コニカミノルタホールディングス.
http://konicaminolta.jp/about/research/technology_report/2006/pdf/introduce_013.pdf
(2) 芹田保明ほか；DSC用センサスイング方式手ぶれ補正技術の開発，Konica Minolta Techology，Vol.1，2004年，コニカミノルタホールディングス.
http://konicaminolta.jp/about/research/technology_report/2004/pdf/introduce_021.pdf
(3) 北村 透；姿勢や手ぶれの検出 ジャイロセンサの用途，トランジスタ技術SPECIAL，No.96，pp.159-164，2006年10月，CQ出版社.
(4)*坂下幸男；姿勢や手ぶれの検出 圧電振動型の使い方，トランジスタ技術SPECIAL，No.96，pp.159-164，2006年10月，CQ出版社.
(5) 北村透；MEMS角速度センサをシステムに組み込む，MEMS開発&活用スタートアップ，Design Wave Magazine，2004年12月号増刊，pp159-179，CQ出版社.
(6) 山崎健一；振動や衝撃の検出，トランジスタ技術SPECIAL，No.96，pp.122-127，2006年10月，CQ出版社.
(7) 山崎健一；加速度や重力を測る，トランジスタ技術SPECIAL，No.96，pp.128-134，2006年10月，CQ出版社.
(8) 杉本利彦；ディジタルカメラ・フォト用語の基礎知識，2007年5月，インプレスジャパン.
(9) デジタル一眼レフ初めての撮影術，2007年1月，朝日新聞社.
(10)*デジタル一眼レフカメラ／K10D，ペンタックス.
http://www.digital.pentax.co.jp/ja/35mm/k10d/feature.html

やまざき・けんいち

<筆者プロフィール>
山崎健一．センサ周辺回路に従事して30年のシニア技術者です．磁気センサ，光センサ，温度センサに関するものが多いのですが，最近ではアナログ回路全般の設計も担当するようになりました．若手技術者育成のためのセミナ活動にも意欲的に取り組んでいます.